

## RENTABILIZACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS ACÚSTICOS ABSORBENTES

PACS: 43.20.Gp

J. Pfretzschner; R.M<sup>a</sup>. Rodriguez  
Instituto de Acústica, CSIC  
Serrano 144  
28006 Madrid  
Tel: 915 618 806  
Fax: 914 117 651  
E-Mail: [iacjp36@ia.cetef.csic.es](mailto:iacjp36@ia.cetef.csic.es)

### ABSTRACT

It has been found many design deficiencies in executed absorbent acoustical treatments. In some occasions their intrinsic acoustical characteristics are not adequate for the frequency range they are prepared and more, the layer thickness of the devices are overestimated, which involves a higher price of the product.

In Tecnia Acústica 2000, the authors described the general aspect of the topic. In the present paper, it will be explained the existence of an asymptotic value of the absorption coefficient function  $\alpha(f)$  for a given absorbing material, in function of the layer thickness. Based on this fact, it is possible to define a critical thickness, that optimises the acoustic absorption of the device. To increase this value of the layer, has a consequence an unnecessary waste of absorbent material.

### RESUMEN

Con frecuencia los tratamientos acústicos absorbentes ejecutados presentan deficiencias de diseño para el supuesto fin de su utilización. En muchas ocasiones sus características intrínsecas acústicas no son las mas adecuadas para el rango de frecuencias a absorber, y aún más, generalmente los espesores de los tratamientos están sobredimensionados, con el consiguiente encarecimiento del producto.

En Tecnia Acústica 2000, los autores trataron los aspectos generales del tema, mientras que en el presente trabajo se incide en la existencia de una asíntota horizontal del coeficiente de absorción  $\alpha(f)$  en función del espesor de la capa de material absorbente, que conduce a la determinación de un espesor crítico para el que se optimiza la absorción del dispositivo. Aumentar este valor de la capa a partir del espesor crítico solo conduce a un gasto innecesario de material acústico.

## INTRODUCCIÓN

La atenuación de una onda acústica en un material poroso, fibroso o granular, está íntimamente relacionada con la parte real de la función compleja de propagación,  $k$ .

En tratamientos acústicos absorbentes con un gran espesor, se requieren valores bajos de su resistividad al flujo de aire normalizado,  $\sigma$ , al objeto de que su impedancia superficial sea del mismo orden que la impedancia específica del fluido que rodea al material con el fin de obtener valores de absorción,  $\alpha$ , próximos a la unidad.

Por el contrario, cuando se utilizan espesores de capa pequeños, dispuestos sobre un fondo rígido, la parte real  $k$  debe tomar valores altos y con ella  $\sigma$ . Otro aspecto vital a considerar es el espesor mínimo de material acústico absorbente, con el que se alcanza el grado de absorción deseado.

Es muy escasa la bibliografía que trata detenidamente estos problemas, cuyas repercusiones económicas pueden tener una gran importancia. En general los tratados de ingeniería [1, 2] se conforman con aspectos y/o recomendaciones básicas, tales como advertir que “cuando la profundidad total de una capa de material absorbente con o sin espacio de aire entre ésta y la pared rígida sobre la que se dispone es inferior a  $\lambda/4$ , el coeficiente de absorción a baja frecuencia del material, decrece al disminuir la frecuencia. La frecuencia de corte por debajo de la cual decrece el coeficiente de absorción viene dada aproximadamente por la relación  $f=c/2d$  (Hz) siendo  $d$  la profundidad total de la muestra mas el posible espacio de aire posterior”.

Al objeto de realizar un estudio teórico de predicción del comportamiento de un dispositivo absorbente basado en la utilización de materiales acústicos porosos (fibrosos o granulares) es necesario contar con algoritmos matemáticos que describan con suficiente precisión su comportamiento ante una excitación acústica, en función de los parámetros microestructurales asociados a ellos.

Desde hace mas de 50 años existe una gran profusión de trabajos que intentan esta descripción analítica [3, 4, 5], en especial los materiales de tipo fibroso, y una breve reseña junto con los procedimientos de medida de las características intrínsecas de los mismos puede encontrarse en [6,7].

En primer lugar trataremos los modelos fibrosos, compuestos fundamentalmente por lanas minerales y fibras de vidrio, ya que en general basta con el conocimiento de un único parámetro microestructural: resistividad al flujo de aire  $\sigma$ , para describir su comportamiento acústico. Los otros parámetros microestructurales como son la porosidad,  $\Omega$  y la tortuosidad,  $T$ , toman valores muy próximos a la unidad. En estos casos está ampliamente consensuado que las expresiones empíricas de Delany y Bazley, o las mas ajustadas de Allard y Champoux [8], y/o las mas complejas de Mechel [9], ofrecen muy buenas aproximaciones con los resultados experimentales. Es por ello que este tipo de materiales resulta idóneo para las comprobaciones experimentales de las diferentes propuestas teóricas.

El estudio puede hacerse extensivo a los materiales porosos granulares, pero en este caso, la absorción acústica es muy sensible a los otros parámetros  $\Omega$  y  $T$  (porosidad y tortuosidad), que dependen de la tipología y constitución del material. Generalmente  $\Omega$  varía entre 0.3 y 0.7, y  $T$  entre 1.2 y 2.7. Una dificultad añadida en este estudio es que las diferentes formulaciones deben contar con uno o dos parámetros de ajuste referidos a los factores de forma (relacionados con el tipo de estructura – huecos- intrínseca del material, según las propuestas de diferentes autores [8]).

Con objeto de una mayor simplificación en el tratamiento, se ha considerado materiales de reacción local (independientes del ángulo de incidencia de la onda acústica excitadora) con lo que se elimina en las formulaciones el término en  $\cos\varphi$  (ángulo de incidencia respecto a la normal la superficie del material). Al margen de ello se ha supuesto incidencia normal (con lo que el tratamiento es extensivo a materiales de reacción extendida en este caso particular), con objeto de comprobar los desarrollos teóricos con los resultados experimentales realizados en

tubo de ondas estacionarias. Suponemos así mismo que se trata de una capa plana de un determinado espesor aplicada sobre un fondo rígido (de impedancia acústica infinita).

## ASPECTOS TEÓRICOS

El estudio parte de una onda acústica plana que incide normal a la superficie de un material acústico absorbente, poroso, homogéneo e isótropo, apoyado sobre una pared rígida cuya impedancia puede suponerse infinita. El campo de presiones en el interior del material es la suma de una onda incidente y una reflejada por la pared rígida:

$$p(x, \omega) = Ae^{jk_x x} + Be^{-jk_x x} \quad (1)$$

siendo  $k_x$  la componente según el eje  $x$  de la constante de propagación en el material, obviando el término temporal  $e^{j\omega t}$ . Dado que se restringe el estudio a propagación con incidencia normal, la constante de propagación  $k_x$ , que en general es una función compleja, la escribiremos como:

$$k = \alpha + j\beta \quad (2)$$

en la que la parte imaginaria corresponde a la constante de atenuación en el material y la parte real a la constante de fase  $\omega/c$ .

Suponiendo semiinfinito el espesor de la capa de material acústico absorbente, solo se debe considerar la onda refractada que se propaga en el interior del material:

$$p_i(x, \omega) = Ae^{jk_x x} \quad (3)$$

cuya amplitud sufrirá una atenuación a medida que se propaga según el eje  $x$  (se supone que la superficie del material está en  $x=0$ ).

En efecto, la dependencia con  $x$  de la magnitud de la amplitud compleja de la presión acústica está dada por:

$$\left| \frac{p(x)}{p(0)} \right| = e^{-\beta x} \quad (4)$$

y la correspondiente atenuación, en decibelios desde  $x=0$  a  $x=L$ , es la función de  $\beta$ :

$$Att = 20 \log e^{-\beta L} = -8.68 \beta L \text{ dB} \quad (5)$$

Sin embargo, aunque teóricamente la onda sonora puede propagarse hasta el infinito, la onda incidente penetra en el material solo hasta una cierta profundidad, que depende de la resistividad al flujo de aire del material y de la frecuencia de la señal. Siempre existe un espesor finito para el que el valor de la impedancia superficial del material,  $Z_s$ , se aproxima al de su impedancia característica,  $Z_c$ , o lo que es lo mismo: se ha producido, en el interior del material, una atenuación infinita de la energía de la onda. A través de esta situación, puede definirse un "espesor crítico",  $L_c$ , como:

$$L_c = \frac{-Att_c}{8.68 \text{Im}\{k_c\}} \quad (6)$$

Introduciendo el valor de  $L_c$  en la conocida expresión que relaciona la impedancia superficial de una capa acústica apoyada sobre una pared rígida:

$$Z_s = -jZ_c \cot \left[ k_c \frac{-Att_c}{8.68 \text{Im}\{k_c\}} \right] \quad (7)$$

y aplicando la condición  $Z_s=Z_c$ , resulta:

$$-j \cot \left( k_c \frac{-Att_c}{8.68 \text{Im}\{k_c\}} \right) = 1 \quad (8)$$

En la figura 1, se representan las partes real e imaginaria de la ec(9) en función de la

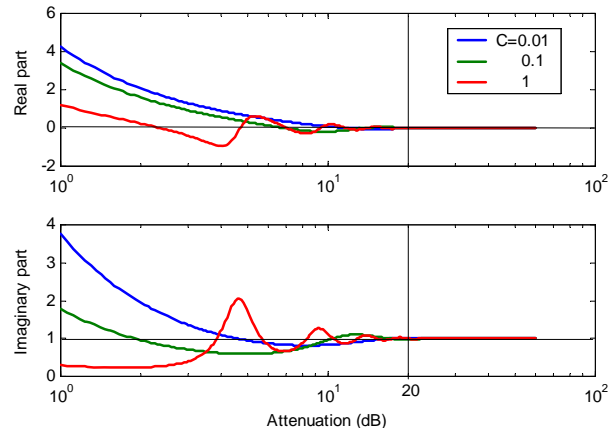


Figura 1. Partes real e imaginaria de la ec(8) en función de la atenuación

atenuación. Con objeto de universalizar las curvas se ha utilizado el parámetro  $C=\rho_0 f / \sigma$  propuesto por Delany, en la definición empírica de  $Z_c$  y  $k_c$ , así como los márgenes de variación autorizados. Puede apreciarse en la figura que una atenuación de la onda de 20 dB es suficiente para caracterizar el “espesor crítico”. Para esta situación, el error entre el coeficiente de absorción obtenido para el espesor crítico y el obtenido para un espesor infinito es inferior a  $\pm 0.8 \%$  (equivalente a 0.07dB) independientemente de la  $\sigma$  o de la frecuencia empleada.

Si consideramos aceptable una atenuación de 8.7 dB, equivalente a una disminución de la amplitud de la presión en  $1/e$ , el error puede alcanzar el  $\pm 6\%$  (0.5dB). Sin embargo la diferencia es considerable, ya que el hecho de aceptar un error del 6% representa reducir el espesor crítico en un factor 2.3, con las consiguientes repercusiones económicas y constructivas.

#### Variación de la absorción acústica con el espesor de la capa de material.

Es bien conocida la dependencia del coeficiente de absorción,  $\alpha$ , con la impedancia superficial del material y a su vez la dependencia de esta con la resistividad al flujo,  $\sigma$ , la frecuencia,  $f$ , y el espesor de la muestra. La representación gráfica de esta variación exigiría una figura tridimensional, que no permitiría apreciar con suficiente detalle los aspectos a destacar; por ello se ha preferido realizar distintas proyecciones sobre los correspondientes planos cartesianos.

En primer lugar interesa verificar la existencia de un valor asintótico de  $\alpha(f)$  con el espesor del material.

Como ya hemos dicho, para espesores de suficiente magnitud, la onda directa que incide sobre la superficie del material (transmitida) se irá atenuando progresivamente, en función de sus características propias y las físicas del material. Ello tendrá como consecuencia una “saturación” del coeficiente de absorción a partir de una determinada distancia. Este hecho dependerá de las dos características que definen el comportamiento del material (fibroso en

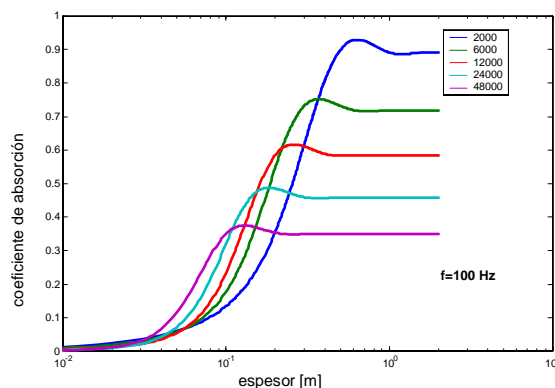


Figura 2. Variación del coeficiente de absorción con el espesor de la capa para materiales con diferentes resistividades al flujo a la frecuencia de 100 Hz

este caso),  $\sigma$  y  $f$ .

En la figura 2 se ofrece la variación del coeficiente de absorción con el espesor de la capa para distintos materiales clasificados por un orden creciente de sus resistividades al flujo. En este caso, se ha elegido una frecuencia de excitación de 100 Hz, por su valor representativo del comportamiento de los materiales (frecuencia mas baja de los tercios de octava utilizados en la acústica de la edificación), para la que además el espesor crítico toma el valor mas alto, es decir, actuará como cota superior de los espesores a emplear.

En la figura puede apreciarse como el material de menor resistividad al flujo presenta la mayor capacidad de absorción (valor asintótico de  $\alpha$  mayor). Análogas curvas pueden obtenerse para diferentes frecuencias o variaciones de resistividades al flujo.

También se comprueba como los materiales con resistividades mas altas obtienen su valor máximo de absorción (asíntota) para espesores mucho menores, a costa de presentar coeficientes de absorción mas bajos.

Otra proyección interesante es la que ofrece la variación del coeficiente de absorción con el espesor del material para distintas frecuencias. Así en la figura 3 se muestra la variación de  $\alpha$  con el espesor del material (lana mineral,  $\sigma = 10000 \text{ Nsm}^{-4}$ ),

Se han superpuesto los valores experimentales correspondientes solo para tres frecuencias de las 14 ensayadas en el tubo de Kundt (tercios de octava entre 100 y 2000 Hz), con objeto de la mejor claridad del dibujo

Puede comprobarse como la frecuencia mas baja de utilización es la que condiciona el espesor crítico mayor. También se comprueba de forma experimental el comportamiento asintótico del coeficiente de absorción con el espesor de la capa, independientemente de la frecuencia que se considere, aunque naturalmente el valor absoluto del coeficiente de absorción crezca con la frecuencia

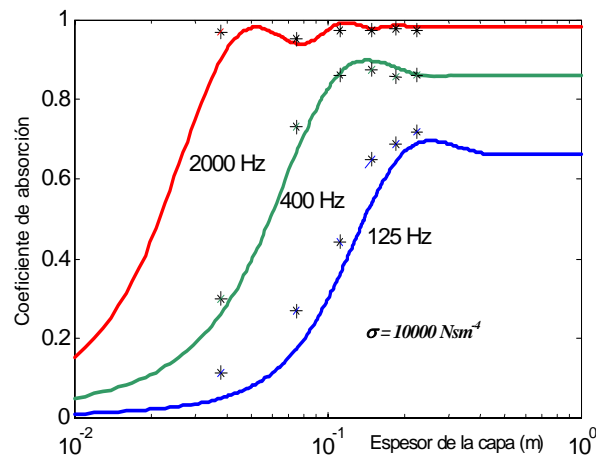


Figura 3 Variación de la absorción con el espesor del material para distintas frecuencias de excitación

Este ensayo que se ha repetido para otros materiales fibrosos y para materiales granulares (granza de caucho) permite comprobar los planteamientos teóricos expuestos a lo largo de este trabajo.

En el caso de materiales granulares se obtendrían familias de curvas análogas a las de las figuras 2 y 3, con la diferencia de que el valor asintótico de la absorción se alcanza tras una sucesión de máximos y mínimos (y no de forma tan suave como en aquellas), debido a que en general la atenuación por unidad de distancia recorrida es menor en los materiales granulares que en los fibrosos (figura 4)

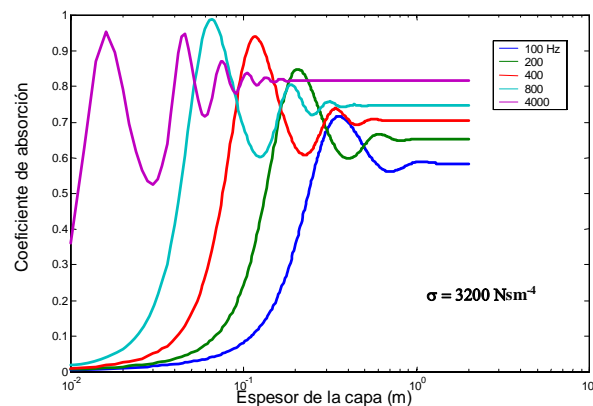


Figura 4 Variación del coeficiente de absorción de un material poroso granular ( $\sigma=3200$ ,  $T=1.3$ ,  $\Omega=0.54$ ) con el espesor de la muestra para distintas frecuencias.

Otro aspecto que puede ser de gran utilidad para el diseñador de tratamientos acústicos es el de disponer de datos para poder elegir el material acústico mas apropiado ( $\sigma$ ) al objeto de obtener una determinada absorción en un margen de frecuencias (caracterizado por la frecuencia mas baja a tratar). Así en la figura 5 se muestra una familia de curvas de la absorción en función de la distancia crítica (eje de abscisas) para distintas frecuencias.

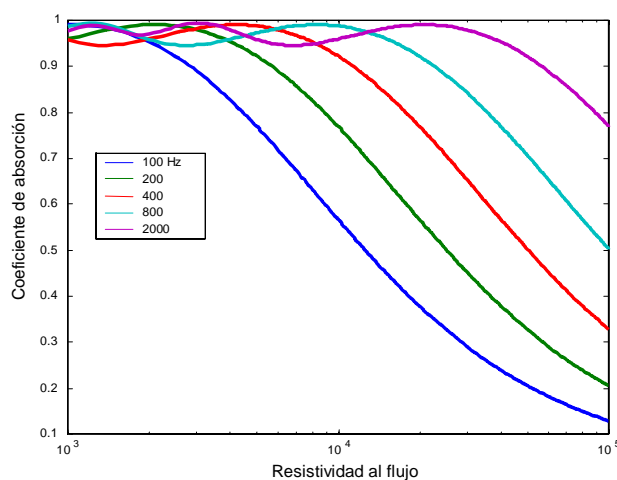


Figura 5 Variación de  $\alpha$  con la resistividad al flujo de aire para distintas frecuencias en un material fibroso con un espesor de la capa igual al espesor crítico

Así por ejemplo si la frecuencia de corte inferior del sistema es 100 Hz se obtendrá una absorción del 95 % cuando se emplee un material con una  $\sigma = 2000 \text{ Nsm}^{-4}$ , debiendo obtener el espesor crítico del material del orden de 100 cm (expresión en la que se admite implícitamente un error del 0.8 % o bien 43 cm admitiendo un error del 6%). También puede observarse en esta figura que para frecuencias superiores a 2000 Hz se consigue una buena absorción con una gran variedad de materiales ( $\sigma$ ), recomendándose para estas situaciones los de resistividad mas elevada ya que requieren espesores críticos menores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. R. Moulder en Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control, cap. 30 Editor C. Harris, Mc. Graw Hill, 1995.
2. F.P. Mechell. en Noise and Vibration Control Engineering, cap 8 Editores L.L. Beranek, I.L.Vér John Wiley & Sons, 1992
3. K. Attenborough, Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. J. Acoust. Soc. Am., 73, (3), 785-99, 1983.
4. Y. Champoux, M.R. Stinson, On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. J. Acoust. Soc. Am. 92 (2), 1120-31, 1992
5. Y. Champoux, M.R. Stinson, G.A. Daigle, Air based system for the measurements of porosity, J. Acoust. Soc. Am. 89, 910-16, 1990
6. J. Pfretzschner, R.Mª. Rodríguez, Acoustic properties of rubber crumbs. Polymer Testing, 18, 81-92, 1999
7. M.E. Delany, E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. App. Acoustics (3) 105-116, 1970.
8. J.F. Allard, Y. Champoux, New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, J. Acoust. Soc. Am. 91, (6), 3346-53, 1992.
9. F.P. Mechel, Design charts for sound absorber layers. J. Acoust. Soc. Am. 83, 3, pp 1002-13, 1988.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se encuadra dentro del Proyecto de Investigación AMB 98-1029 del Plan Nacional de I+D de la DGICYT.